

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич

Должность: ректор

Дата подписания: 25.09.2022 16:39:46

Уникальный программный ключ:

9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

## **МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет»  
(ЮЗГУ)

Кафедра теплогазоводоснабжения



### **ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

Методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов очной и заочной формы обучения направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

Курск 2017 г.

УДК 536.7

Составители: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры  
теплогазоводоснабжения В.С. Ежов

**Техническая термодинамика:** методические указания и задания к практическим занятиям и самостоятельной работе для студентов очной и заочной формы обучения направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин, Н.С. Кобелев, Е.М. Кувардина. – Курск, 2017. – 32 с.: ил. 9, табл. 15, прилож. 4. – Библиогр.: с. 29.

Приводятся задания к практическим занятиям и самостоятельной работе по технической термодинамике и примеры решения задач, а также необходимый справочный материал в виде таблиц и диаграмм.

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки 08.03.01 «Строительство», 08.04.01 «Строительство», 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» очной и заочной формы обучения и могут быть использованы студентами как для аудиторных практических занятий, так и для самостоятельной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать . Формат 60x84 1/16.

Усл. печ.л. Уч. изд.л. Тираж 100 экз. Заказ . Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.  
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Методические указания к заданиям и самостоятельной работе.

1. Работа должна выполняться самостоятельно, после проработки соответствующих теоретических разделов курса.

2. Перед решением задач необходимо разобрать условие задачи и по последней и предпоследней цифрам учебного шифра выбрать в таблицах свои исходные данные.

3. При выполнении расчетной работы расчеты необходимо оформить в следующем виде: расчетная формула – формула с числовыми значениями всех входящих величин – результат вычисления (результаты промежуточных расчетов по формуле не приводить!) – единицы измерения рассчитываемой величины.

### ЗАДАЧА № 1

Определить массовый расход газа (кг/с) при известном объемном расходе  $V$  м<sup>3</sup>/мин, температуре  $t$  °С и манометрическом давлении  $P_m$  кПа. Барометрическое давление составляет  $B=98100$  Па.

Таблица 1.1- Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	Газ	$V$ , м <sup>3</sup> /мин	Предпоследняя цифра шифра	$t$ , °С	$P_m$ , кПа
0	СО	0,4	0	80	40
1	СО <sub>2</sub>	0,5	1	65	42
2	N <sub>2</sub>	0,6	2	70	50
3	Воздух	0,1	3	75	70
4	O <sub>2</sub>	0,5	4	85	45
5	СО <sub>2</sub>	0,4	5	80	50
6	СН <sub>4</sub>	0,2	6	70	60
7	Воздух	0,3	7	75	72
8	O <sub>2</sub>	0,4	8	65	80
9	N <sub>2</sub>	0,2	9	85	55

Исходные данные:  $V=$  , м<sup>3</sup>/мин;  $t=$  , С°;  $P_m=$  , кПа; газ -

#### Решение

1. Перевод единицы измерения объемного расхода из м<sup>3</sup>/мин в м<sup>3</sup>/с

$$V=V/60= \text{ , м}^3/\text{с.} \quad (1.1)$$

2. Абсолютное давление

$$P=B+1000 P_m= \text{ , Па.} \quad (1.2)$$

3. Массовый расход газа (из уравнения состояния идеального газа  $pV = GRT$ ):

$$G = P \cdot V / (R \cdot T) = \text{, кг/с,} \quad (1.3)$$

где  $R = 8314/\mu$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К);  
 $\mu$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. Прилож. табл. П.1);  
 $T = t + 273, K$  – абсолютная температура газа;  $P$ , Па – абсолютное давление газа;  $V$ , м<sup>3</sup>/с – объемный расход газа.

### ЗАДАЧА № 2

Смесь газов, для которой известен объемный состав: находится при давлении  $P_{см.}$  и температуре  $t_{см.}$ .

Определить молекулярную массу смеси и ее газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси при заданных условиях и при нормальных условиях, а также парциальные давления компонентов смеси.

Таблица 2.1 - Исходные данные к расчету

Посл. цифра шифра	$P_{см.}$ , мм рт.ст.	$t_{см.}$ , °C	Предпол. цифра шифра	Объемный состав смеси, %			
				N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
0	748	150	0	40	20	30	10
1	750	250	1	50	25	13	12
2	760	350	2	60	30	2	8
3	740	450	3	70	25	1	4
4	752	150	4	80	10	5	5
5	758	250	5	85	11	3	1
6	760	150	6	75	17	4	4
7	768	100	7	65	23	4	8
8	770	100	8	55	27	8	10
9	768	200	9	45	22	18	15

Исходные данные:  $r_{N_2} = \text{ \%}$ ;  $r_{O_2} = \text{ \%}$ ;  $r_{CO_2} = \text{ \%}$   
 $r_{H_2O} = \text{ \%}$ ;  $t_{см.} = \text{ °C}$ ;  $P_{см.} = \text{ мм рт.ст. .}$

## Решение

1. Перевод единицы измерения давления из мм рт. ст. в Па

$$P_{см.} = P_{см.рт.ст.} \cdot 133,3 = \quad , \text{ Па}; \quad (2.1)$$

2. Кажущаяся молекулярная масса смеси

$$\mu_{см.} = (\mu_{N_2} \cdot r_{N_2}) + (\mu_{O_2} \cdot r_{O_2}) + (\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}) + (\mu_{H_2O} \cdot r_{H_2O}) = \quad , \text{ кг/кмоль}, \quad (2.2)$$

где  $\mu_{N_2}=28$ ,  $\mu_{O_2}=32$ ,  $\mu_{CO_2}=44$ ,  $\mu_{H_2O}=18$  – молекулярные массы азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара, кг/кмоль;

$r_{N_2}$ ,  $r_{O_2}$ ,  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$  – объемные доли компонентов смеси (в долях единицы).

3. Газовая постоянная смеси

$$R_{см.} = 8314 / \mu_{см.} = \quad , \text{ Дж/(кг К)}. \quad (2.3)$$

4. Удельный объем смеси (из уравнения состояния  $P_{см.} \cdot v_{см.} = R_{см.} T_{см.}$ ) и плотность смеси при заданных условиях  $v_{см.} = R_{см.} T_{см.} / P_{см.} = \quad , \text{ м}^3/\text{кг}$  и  $\rho_{см.} = 1/v_{см.} = \quad , \text{ кг/м}^3$ , где  $P_{см.}$  – давление смеси, Па;

$$T_{см.} = t_{см.} + 273 = \quad , \text{ К} \quad (2.4)$$

$T_{см.}$  – абсолютная температура смеси.

5. Удельный объем смеси  $v_{см.0}$  и плотность смеси  $\rho_{см.0}$  при нормальных условиях:

$$v_{см.0} = R_{см.} T_{см.0} / P_{см.0} = \quad , \text{ м}^3/\text{кг} \quad (2.5.1)$$

$$\rho_{см.0} = 1/v_{см.0} = \quad , \text{ кг/м}^3, \quad (2.5.2)$$

где  $P_{см.0} = 1,013 \cdot 10^5$  Па и  $T_{см.0} = 273$  К – давление смеси и ее абсолютная температура при нормальных условиях.

6. Парциальные давления компонентов смеси

$$P_{N_2} = P_{см.} \cdot r_{N_2} = \quad , \text{ Па}; \quad (2.6.1)$$

$$P_{O_2} = P_{см.} \cdot r_{O_2} = \quad , \text{ Па}; \quad (2.6.2)$$

$$P_{CO_2} = P_{см.} \cdot r_{CO_2} = \quad , \text{ Па}; \quad (2.6.3)$$

$$P_{H_2O} = P_{см.} \cdot r_{H_2O} = \quad , \text{ Па}, \quad (2.6.4)$$

где  $r_{N_2}$ ,  $r_{O_2}$ ,  $r_{CO_2}$ ,  $r_{H_2O}$  – объемные доли компонентов смеси (в долях единицы).

### ЗАДАЧА № 3

Определить средние массовые и объемные теплоемкости газа при условии  $P=Const$  и  $v=Const$  в интервале температур  $t_1 \div t_2$ . Вычислить также удельную теплоту изохорного процесса для данного интервала температур, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Таблица 3.1 - Исходные данные к расчету (по последней цифре шифра)

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO
t <sub>1</sub> , °C	50	120	55	20	25	18	22	28	30	45
t <sub>2</sub> , °C	250	350	300	450	400	150	180	220	280	150

Исходные данные: t<sub>1</sub> = °C; t<sub>2</sub> = °C; газ.

#### Решение

1. Средняя изобарная мольная теплоемкость газа,  $\mu C_{pm}$ , в интервале температур  $t_1 \div t_2$  (выбираем формулу  $\mu C_{pm} =$  по Прилож., табл. П.2 для заданного газа, среднюю)

$$\mu C_{pm} = , \text{кДж}/(\text{К} \cdot \text{кмоль}), \quad (3.1)$$

где  $t = t_1 + t_2 =$  , °C - определяющая температура.

2. Средняя изохорная мольная теплоемкость газа в интервале температур  $t_1 \div t_2$  (из уравнения Майера)

$$\mu C_{vm} = \mu C_p - 8,314 = , \text{кДж}/(\text{К} \cdot \text{кмоль}), \quad (3.2)$$

где 8,314 – универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К).

3. Средние массовые изобарная и изохорная теплоемкости газа в интервале температур  $t_1 \div t_2$

$$C_{pm} = \mu C_{pm} / \mu = , \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (3.3.1)$$

$$C_{vm} = \mu C_{vm} / \mu = , \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (3.3.2)$$

где  $\mu$  – молекулярная масса газа, кг/кмоль, (см Прилож. , табл. П.1).

4. Средние объемные изобарная и изохорная теплоемкости газа в интервале температур  $t_1 \div t_2$

$$C_{pm} = \mu C_{pm} / V_\mu = , \text{кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К}); \quad (3.4.1)$$

$$C_{vm} = \mu C_{vm} / V_\mu = , \text{кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К}); \quad (3.4.2)$$

где  $V_\mu = 22,4$  – объем одного кмоль газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>/кмоль

5. Удельная теплота изохорного процесса

$$q = C_{vm} \cdot (t_2 - t_1) = , \text{кДж}/\text{кг}; \quad (3.5)$$

### ЗАДАЧА № 4

$V_1$  м<sup>3</sup> газа с начальным давлением  $P_1$  и начальной температурой  $t_1$  сжимается до изменения объема в  $\varepsilon$  раз ( $\varepsilon = v_1/v_2$ ). Сжатие происходит по политропе с показателем политропы  $n$ . Определить массу газа, конечные объем, давление и температуру газа, работу сжатия, количество отведенного тепла, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии газа. (При расчете процесса принять теплоемкость газа не зависящей от температуры).

Изобразить процесс сжатия в  $P$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах и обозначить основные термодинамические процессы.

#### Решение

Изображаем процесс в  $P$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах, рис.1.

По условию задачи исследуемый процесс – процесс сжатия с показателем политропы в пределах 1 и  $\kappa$  ( $\kappa=1,4$ ), следовательно, в  $P$ - $v$  координатах процесс расположен в области сжатия между изотермическим процессом ( $n=1$ ) и адиабатным процессом ( $n=\kappa$ ), процесс 1-2. Отмечаем в виде площадей работу процесса (в  $P$ - $v$  координатах) и теплоту процесса (в  $T$ - $s$  координатах) с их знаками.

Таблица 4.1 - Исходные данные к расчету

Последняя - цифра шифра	Газ	$V_1$ , м <sup>3</sup>	$P_1$ , МПа	Предпол. цифра шифра	$\varepsilon$	$t_1$ , °C	$n$
0	СО	50	0,1	0	10	10	1,35
1	N <sub>2</sub>	55	0,15	1	8	15	1,32
2	H <sub>2</sub>	60	0,17	2	7	17	1,20
3	O <sub>2</sub>	65	0,12	3	12	20	1,25
4	воздух	70	0,11	4	15	25	1,3
5	N <sub>2</sub>	45	0,14	5	17	30	1,22
6	H <sub>2</sub>	40	0,18	6	10	5	1,18
7	воздух	30	0,2	7	13	15	1,28
8	СО	50	0,19	8	9	25	1,26
9	O <sub>2</sub>	60	0,15	9	15	35	1,38

Исходные данные: Газ - ;  $V_1 =$  , м<sup>3</sup>;  $P_1 =$  , МПа;  $\varepsilon =$  ;  $t_1 =$  , °C;  $n =$

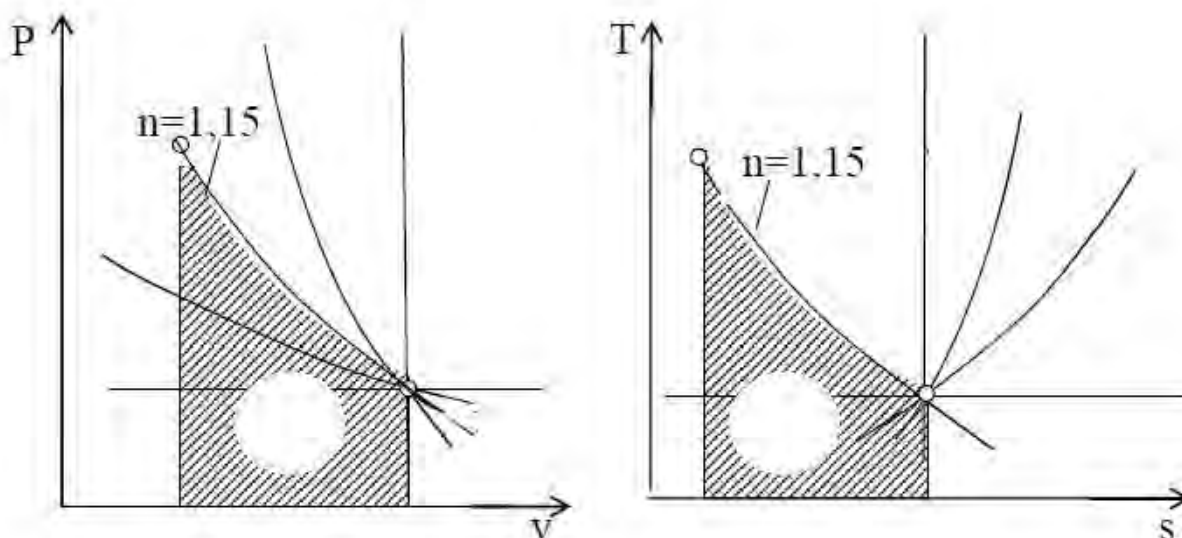


Рис.1. Политропический процесс сжатия в P-v и T-s координатах

### Решение

1. Параметры состояния в точках 1 и 2 (из условия задачи)

Точка 1	$P_1 =$ , МПа;	Точка 2	$P_2 = ?$ МПа	
	$t_1 =$ , °С		$t_2 = ?$ , °С	
	$v_1 = ?$ , м <sup>3</sup> /кг;		$v_2 = ?$ , м <sup>3</sup> /кг;	(4.1)
	$V_1 =$ , м <sup>3</sup>		$V_2 = ?$ , м <sup>3</sup>	

2. Масса газа (из уравнения состояния)

$$m = (P_1 \cdot V_1) / (R \cdot T_1) \text{ , кг,} \quad (4.2.1)$$

где  $P_1$  – давление в точке 1, Па (1 МПа=10<sup>6</sup> Па);  $V_1$  – объем в первой точке, м<sup>3</sup>;

$$R = 8,314 / \mu = \text{ , Дж/(кг \cdot К);} \quad (4.2.2)$$

где  $R$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/кг·К;

$\mu$  - молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. Прилож. табл.П.1);

$T_1 = 273 + t_1 =$  , К – абсолютная температура в первой точке.

3. Определяем недостающие параметры состояния в т.т.1 и 2.

а) полный и удельный объемы газа в конечной точке (т.2)

$$V_2 = V_1 / \varepsilon = \text{ , м}^3; \quad (4.3.1)$$

$$v_2 = V_2 / m = \text{ , м}^3/\text{кг}; \quad (4.3.2)$$

б) удельный объем газа в начальной точке (т.1)

$$v_1 = V_1 / m = \text{ , м}^3/\text{кг}; \quad (4.3.3)$$

в) давление и температуру газа в конце сжатия определяем из формул соотношения между параметрами для политропического процесса:

$$P_2 / P_1 = (v_1 / v_2)^n; \quad (4.3.4)$$



$$T_2/T_1=(P_2/P_1)^{(n-1)/n}, \quad (4.3.5)$$

$$T_2/T_1=(v_1/v_2)^{n-1}. \quad (4.3.6)$$

Давление

$$P_2=P_1 (v_1/v_2)^n=P_1 \cdot \epsilon^n = \text{ , МПа}; \quad (4.3.7)$$

Температура

$$T_2=T_1 (v_1/v_2)^{n-1}=T_1 \cdot \epsilon^{n-1} = \text{ , К}, \quad (4.3.8)$$

где  $P_1$ ,  $T_1$  - см. п.2; и  $n$  – см. условие задачи.

4. Определяем теплоемкость политропного процесса

$$C=C_v (n-k)/(n-1) = \text{ , кДж/(кг · К)}. \quad (4.4.1)$$

где  $n$  – показатель политропы (из условия задачи);  $k$  – показатель адиабаты ( $k=C_p/C_v$ ),  $C_p$  и  $C_v$  – массовые теплоемкости газа.

По условию  $C=Const$ , т.е. теплоемкость не зависит от температуры. В этом случае она зависит только от числа атомов в молекуле газа. Заданный газ – двухатомный. Для двухатомных газов значения мольных теплоемкостей  $\mu C_p=29,31$  кДж(кмоль К). и  $\mu C_v=20,93$  кДж(кмоль К). .

Массовые теплоемкости газа:

$$C_p = \mu C_p / \mu = \text{ , кДж/(кг · К)}; \quad (4.4.2)$$

$$C_v = \mu C_v / \mu = \text{ , кДж/(кг · К)}, \quad (4.4.3)$$

И окончательно:

$$C=C_v (n-k)/(n-1) = \text{ , кДж/(кг · К)}. \quad (4.4.4)$$

5. Изменения внутренней энергии газа ( $\Delta U$ ), энтальпии ( $\Delta H$ ) и энтропии( $\Delta S$ ):

$$\Delta U=m C_v (t_2-t_1) = \text{ , кДж}; \quad (4.5.1)$$

$$\Delta H=m C_p (t_2-t_1) = \text{ , кДж}; \quad (4.5.2)$$

$$\Delta S=m C \ln(T_2/T_1) = \text{ , кДж/К}, \quad (4.5.3)$$

где  $C$  – теплоемкость политропического процесса, см. п 4.

6. Теплота процесса

$$Q=m C (t_2-t_1) = \text{ , кДж} \quad (4.6)$$

7. Работа процесса

$$L=m R (T_1-T_2)/(n-1) = \text{ , кДж} \quad (4.7)$$

8. Проверка решения по первому закону термодинамики

$$Q=\Delta U+L = \text{ , кДж} \quad (4.8)$$

(подставить результаты расчета).

## ЗАДАЧА № 5

Поршневой 2-х ступенчатый компрессор производительностью  $V$  м<sup>3</sup>/мин засасывает атмосферный воздух при температуре  $t_1$  °С и давлении  $P_1$  бар и сжимает его до конечного давления  $P_k$  бар. Процессы сжатия в компрессоре адиабатные.

Определить: 1) давления воздуха по ступеням; 2) температуру воздуха в конце сжатия; 3) теоретическую мощность привода компрессора; 4) количество теплоты, отведенное от воздуха в промежуточных холодильниках 1-ой и 2-ступеней; 5) расход воды на охлаждение, если ее температура повышается на  $\Delta t$  °С.

Как изменятся температура и, соответственно, работа и расход воды на охлаждение, если сжатие будет происходить в одну ступень до того же конечного давления  $P_k$  ?

Представить схему 2-х ступенчатого компрессора и процессы сжатия в P-v и T-s координатах.

Таблица 5.1 - Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	$P_1$ , бар	$t_1$ , °С	Предпол, цифра шифра	$V$ , м <sup>3</sup> /мин	$P_k$ , бар	$\Delta t$ , °С
0	1,0	10	0	3,0	8	13
1	0,8	15	1	10,0	25	8
2	0,9	20	2	8,5	9	10
3	0,98	25	3	3,5	36	12
4	1,00	30	4	10,0	36	20
5	0,89	5	5	4,0	15	18
6	0,90	0	6	4,5	20	15
7	1,00	15	7	9,0	14	16
8	1,00	25	8	6,0	8	12
9	0,98	35	9	10,0	10	25

Исходные данные:  $P_1 =$  , бар;  $P_k =$  , бар;  $t_1 =$  , °С;  $V_1 =$  , м<sup>3</sup>/мин;  $\Delta t =$  , °С

## Решение

Изображаем схему 2-х ступенчатого компрессора (см. рис.2)

и процессы сжатия в P-v и T-s координатах (см. рис.3).

1. Массовая производительность компрессора

$$G = V \cdot \rho / 60 = \text{ , кг/с,}$$

(5.1.1)

где V= , м<sup>3</sup>/мин – объемная производительность компрессора;

$$\rho = P_1 / (R \cdot T_1) = \text{ , кг/м}^3 \quad (5.1.2)$$

где ρ - плотность воздуха на входе в компрессор;

$$T_1 = 273 + t_1 = \text{ , К, } P_1 = \text{ Па (1 бар} = 10^5 \text{ Па).} \quad (5.1.3)$$

2. Расчет работы компрессора в две ступени

1) Степень увеличения давления по ступеням

$$\lambda = (P_k / P_1)^{0,5} = \text{ ,} \quad (5.2.1)$$

где P<sub>к</sub>= и P<sub>1</sub>=, бар - конечное давление сжатия и давление при всасывании.

2) Давления по ступеням: 1-я ступень: давление воздуха на входе P<sub>1</sub>=, бар, на выходе

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda = \text{ , бар;}$$

(5.2.2)

2-я ступень: давление воздуха на входе P<sub>2</sub>=, бар, на выходе из цилиндра P<sub>к</sub>=, бар.

3) Температура воздуха в конце сжатия.

$$T_2 = T_1 \lambda^{(k-1)/k} = \text{ , К;} \quad (5.2.3)$$

$$t_2 = T_2 - 273 = \text{ , }^\circ\text{C,} \quad (5.2.3.1)$$

где T<sub>1</sub>=, К, (см.п.1); k=1,4 – показатель адиабаты для воздуха.

4) Теоретическая работа привода компрессора 1-й ступени

$$\ell_{ад} = k \cdot R T_1 [\lambda^{(k-1)/k} - 1] / (k-1) = \text{ , Дж/кг,} \quad (5.2.4)$$

где R=287 Дж/(кг·К) - индивидуальная газовая постоянная для воздуха.

5) Работа 2-х ступенчатого компрессора (на рис 3а удельная работа 2-х ступенчатого компрессора представлена в виде площади a-1-2-3-4-с-b-a)

$$\ell_k = \ell_{ад} \cdot z = \text{ , Дж/кг,} \quad (5.2.5)$$

где z=2 - число ступеней.

6) Мощность привода компрессора

$$N = G \cdot \ell_k = \text{ , Вт,} \quad (5.2.6)$$

где G=, кг/с - производительность компрессора (см. п.1).

7) Количество теплоты, отводимое от воздуха в холодильниках 1-й и 2-й ступеней.

Исходя из условий многоступенчатого сжатия, теплоты, отводимые от воздуха в каждом из холодильников будут одинаковые, т.е.  $Q_{\text{хол } 1} = Q_{\text{хол } 2}$ , а общее количество отведенного тепла

$$Q_{\text{хол}} = z \cdot Q_{\text{хол } 1} = z \cdot G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = \text{Вт}, \quad (5.2.7)$$

где  $z=2$  - число холодильников;

$c_p=1005$  Дж/(кг·К) - теплоемкость воздуха;

$t_1$  и  $t_2$ , °С - температуры воздуха на входе в холодильники и на выходе из них, соответственно.

8) Расход воды на охлаждение воздуха в холодильниках 1-й и 2-й ступеней

$$G_B = Q_{\text{хол}} / (c_B \cdot \Delta t) = \text{кг/с}, \quad (5.2.8)$$

где  $Q_{\text{хол}}$  - количество теплоты, которое забирает вода от воздуха в холодильнике;  $c_B=4186$  Дж/(кг·К) - теплоемкость воды.

$\Delta t$ , °С - увеличение температуры воды при прохождении ее через холодильник (см. задание).

3. Расчет компрессора, в котором сжатие происходит в одну ступень до того же конечного давления  $P_K$ .

На рис.2 процесс сжатия воздуха в одну ступень изображается линией 1-2\*.

1) Степень увеличения давления

$$\lambda^* = P_K / P_1 = \text{,} \quad (5.3.1)$$

где  $P_K$  и  $P_1$ , бар - конечное давление сжатия и давление всасывания.

2) Температура воздуха в конце сжатия.

$$T_2^* = T_1 \lambda^{*(k-1)/k} = \text{, К}; \quad (5.3.2)$$

$$t_2^* = T_2^* - 273 = \text{, °С}, \quad (5.3.2.1)$$

где  $T_1$ , К, (см.п.1);  $k=1,4$  - показатель адиабаты для воздуха.

3) Теоретическая работа привода компрессора

$$\ell_K^* = k R T_1 [\lambda^{*(k-1)/k} - 1] / (k-1) = \text{, Дж/кг}, \quad (5.3.3)$$

где  $R=287$  Дж/(кг·К) - индивидуальная газовая постоянная для воздуха.

4) Мощность привода компрессора.

$$N^* = G \ell_K^* = \text{, Вт}, \quad (5.3.4)$$

где  $G$  кг/с - производительность компрессора.

5) Количество теплоты, отводимое от воздуха в холодильнике

$$Q_{\text{хол}}^* = G \cdot c_p \cdot (t_2^* - t_1) = \text{Вт}, \quad (5.3.5)$$

где  $G = \text{кг/с}$  - производительность компрессора;  $c_p = 1005 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$

теплоемкость воздуха;  $t_2^*$  и  $t_1 = \text{°C}$  - температуры воздуха на входе в холодильник и на выходе из него, соответственно.

б) Расход воды на охлаждение воздуха в холодильнике

$$G_{\text{в}}^* = Q_{\text{хол}}^* / (c_{\text{в}} \Delta t) = \text{кг/с}, \quad (5.3.6)$$

где  $Q_{\text{хол}}^*$  - количество теплоты, которое забирает вода от воздуха в холодильнике;  $c_{\text{в}} = 4186 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  - теплоемкость воды.  $\Delta t = \text{°C}$  - увеличение температуры воды при прохождении ее через холодильник (см. задание).

Полученные результаты сводим в таблицу сравнительных данных и сравниваем между собой.

Таблица 5.2 - Таблица сравнительных данных

Наименование величины	2-х ступенчатое сжатие	Одноступенчатое сжатие до давления $P_{\text{к}}$
Температура в конце сжатия, $\text{°C}$	$t_2 =$	$t_2^* =$
Теоретическая мощность привода компрессора, Вт	$N =$	$N^* =$
Расход воды на охлаждение, кг/с	$G_{\text{в}} =$	$G_{\text{в}}^* =$

Из таблицы видно, что работа компрессора в две ступени по всем показателям экономичнее, чем при работе компрессора в одну ступень при одинаковом конечном давлении сжатия.

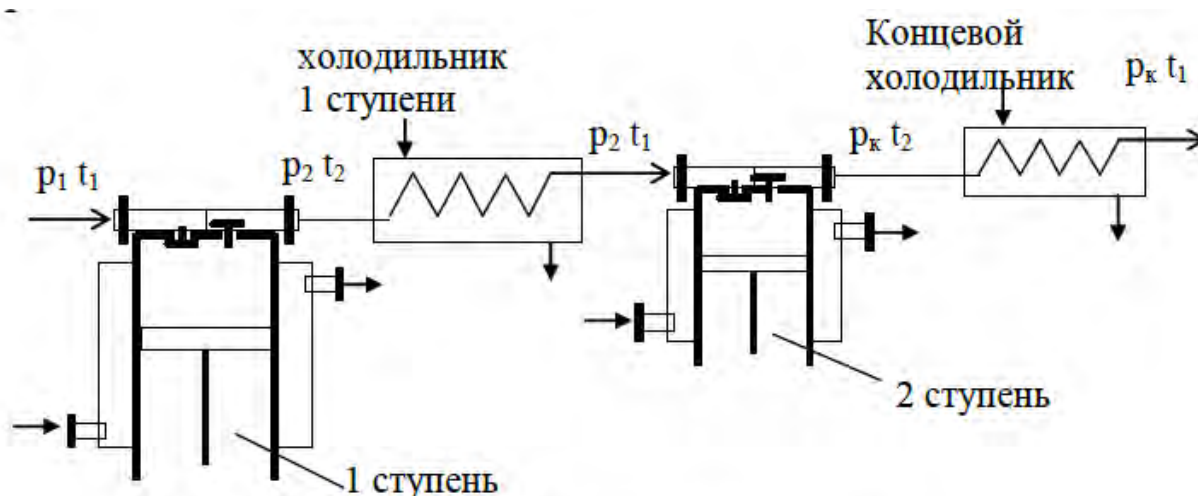


Рис2. Схема 2-х ступенчатого компрессора

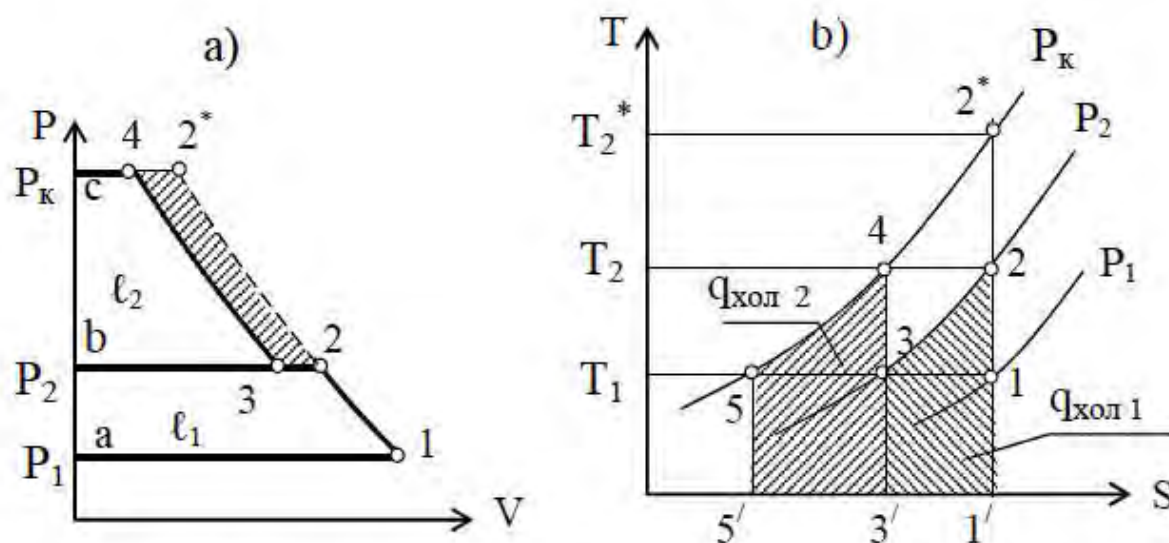


Рис.3 Процессы сжатия газа в двухступенчатом компрессоре

### ЗАДАЧА 6

Рассчитать цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом тепла (рис. 4), заданного параметрами: начальное давление  $P_1$  бар и температура  $t_1^{\circ}\text{C}$ , степень сжатия  $\varepsilon = v_1/v_2$ ; степень повышения давления  $\lambda = P_3/P_2$ . Цикл отнесен к 1 кг воздуха. Теплоемкости принять постоянными и равными:  $C_p = 1,005$  кДж/(кг К),  $C_v = 0,718$  кДж/(кг К),

Определить:

- 1) Недостающие параметры узловых точек цикла;
  - 2) для каждого из процессов цикла подсчитать изменение внутренней энергии  $\Delta u$ , изменение энтальпии  $\Delta h$  и изменение энтропии  $\Delta s$ ;
  - 3) подводимую теплоту  $q_1$  и отводимую теплоту  $q_2$  в цикле;
  - 4) работу цикла  $\ell_{ц}$ ;
  - 5) термический КПД цикла  $\eta_t$ ;
  - 6) Вычислить термический КПД цикла Карно,  $\eta^k$ , осуществляемого в том же интервале температур и относительный КПД цикла;
  - 7) Построить в масштабе цикл ДВС в координатах  $P-v$  и  $T-s$
- Дать сводку полученных величин в прилагаемых таблицах 6.1, 6.2, 6.3.

Таблица 6.1 - Параметры узловых точек цикла

Точка	P, бар	v, м <sup>3</sup> /кг	T, К	t, °С
1				
2				
3				
4				

Таблица 6.2 - Расчетные характеристики процессов цикла

Процессы	C, кДж/(кг·К)	Δu, кДж/кг	Δh, кДж/кг	Δs, кДж/(кг·К)	q, кДж/кг
1 - 2					
2 - 3					
3 - 4					
4 - 1					
		∑±Δu =	∑±Δh =	∑±Δs =	∑ ±q =

Таблица 6.3 - Характеристика цикла

Название величины	Обозначение, размерность	Результаты расчета
Подведенная теплота в цикле	q <sub>подв.</sub> , кДж/кг	
Отведенная теплота в цикле	q <sub>хол.</sub> , кДж/кг	
Полезная теплота цикла	q <sub>пол.</sub> , кДж/кг	
Термический КПД цикла	η <sub>t</sub>	
Термический КПД цикла Карно	η <sub>к</sub>	
Относительный КПД цикла	η <sub>от</sub>	

Таблица 6.4 - Исходные данные для расчета.

Последняя цифра шифра	ε	λ	Предпоследняя цифра шифра	P <sub>1</sub> , бар	t <sub>1</sub> , °С
0	10,0	3,0	0	0,98	12
1	6,14	3,5	1	0,97	15
2	6,10	3,8	2	1,04	20
3	5,04	4,0	3	1,12	25
4	10,0	4,0	4	1,08	28
5	8,0	3,6	5	1,10	25
6	6,0	3,8	6	0,99	22
7	6,7	3,0	7	0,89	10
8	6,9	3,2	8	1,04	24
9	6,8	3,5	9	1,02	18

Исходные данные:  $P_1 =$  бар;  $t_1 =$  °C;  $\varepsilon = v_1/v_2 =$  ;  $\lambda = P_3/P_2 =$  .

Решение

1. Определение параметров рабочего тела в узловых точках цикла для этого последовательно, один за другим, рассчитываем все процессы заданного цикла.

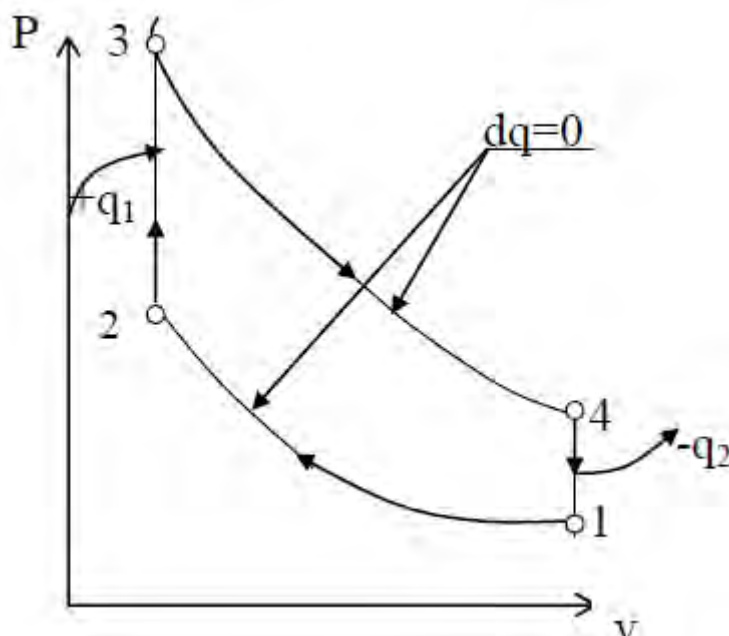


Рис.4. Цикл ДВС с изохорным подводом тепла

1) Процесс 1-2. Узловые точки: 1 и 2.

Определяем параметры рабочего тела в точке 1, ( $P_1, v_1, T_1$ ).

Для точки 1 по условию задачи заданы давление  $P_1$  и температура  $t_1$ . Определяем третий параметр, удельный объем,

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = , \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (6.1)$$

где  $R=287$  Дж/(кг К) – индивидуальная газовая постоянная воздуха;  $P_1$ - давление в первой точке, Па;

$T_1 = 273 + t_1 = ,$  К – абсолютная температура для первой точки.

Определяем параметры рабочего тела в точке 2, ( $P_2, v_2, T_2$ ).

Т.к. процесс 1-2 - адиабатный, то из формул соотношений между параметрами для этого процесса имеем

$$P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^k = , \text{ Па}, \quad (6.2)$$

$$v_2 = v_1 / \varepsilon = , \text{ м}^3/\text{кг}, \quad (6.3)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = , \text{ К}, \quad (6.4)$$

где  $k=1.4$  – показатель адиабаты;  $\varepsilon$  - степень сжатия (из условия задачи).



2) Процесс 2-3. Узловые точки процесса: 2 и 3. Параметры точки 2 уже определены. Определяем параметры рабочего тела в точке 3, ( $P_3, v_3, T_3$ )

Для данного цикла процесс 2-3 - изохорный, следовательно, из условия  $P_3/P_2=T_3/T_2=\lambda$  имеем

$$P_3=P_2 \cdot \lambda = \text{, Па;} \quad (6.5)$$

$$v_3=v_2;$$

$$T_3=T_2 \cdot \lambda = \text{, К,} \quad (6.6)$$

где  $\lambda$  - степень увеличения давления (из условия задачи).

2) Процесс 3-4. Узловые точки процесса 3 и 4. Параметры точки 3 определены выше, поэтому вычисляем параметры рабочего тела в точке 4, ( $P_4, v_4, T_4$ ).

Для двигателей с изохорным подводом тепла процесс 3-4 – адиабатный, следовательно:

$$P_4=P_3 \cdot (v_3/v_4)^k = \text{, Па.} \quad (6.7)$$

3) Параметры  $v_4$  и  $T_4$  можно определить так: процесс 4-1 для данного типа двигателя – изохорный, поэтому  $v_4=v_1= \text{, м}^3/\text{кг}$  и температура:

$$T_4=T_1 (P_4/P_1)^{1/k} = \text{, К.} \quad (6.8)$$

Определение параметров в узловых точках цикла закончено.

Вычисленные параметры в узловых точках этого цикла заносим в таблицу 6.1.

1. Вычисляем для всех процессов цикла ДВС величины:

$\Delta u$  ,  $\Delta h$  ,  $\Delta s$ .

Изменения внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  для каждого из процессов цикла определяются по одним и тем же формулам :

$$\Delta u=C_v (T_{\text{кон}}-T_{\text{нач}})= \text{, кДж/кг;} \quad (6.1.1)$$

$$\Delta h=C_p (T_{\text{кон}}-T_{\text{нач}})= \text{, кДж/кг,} \quad (6.1.2)$$

где  $C_p$ ,  $C_v$  - теплоемкости воздуха, кДж/(кг К), из условия задачи;  $T_{\text{кон}}$ ,  $T_{\text{нач}}$  - конечная и начальная абсолютные температуры каждого из рассматриваемых процессов, К , т.е.

$$\Delta u_{1-2}=C_v(T_2-T_1)= \text{;} \quad (6.1.3)$$

$$\Delta u_{2-3}=C_v(T_3-T_2)= \text{;} \quad (6.1.4)$$

$$\Delta u_{3-4}=C_v(T_4-T_3)= \text{;} \quad (6.1.5)$$

$$\Delta u_{4-1}=C_v(T_1-T_4)= \text{.} \quad (6.1.6)$$

(Значения  $\Delta u_{3-4}$  и  $\Delta u_{4-1}$  будут отрицательные. Знак минус нужно

сохранить.) Точно так же по соответствующей формуле, приведенной выше, определяют изменения энтальпии  $\Delta h$  для всех процессов в цикле.

Изменения энтропии для всех процессов цикла:

$$\Delta s_{1-2}=0; \quad (6.1.7)$$

$$\Delta s_{2-3}=C_v \ln(T_3/T_2)=; \quad (6.1.8)$$

$$\Delta s_{3-4}=0; \quad (6.1.9)$$

$$\Delta s_{4-1}=C_v \ln(T_1/T_4)=; \quad (6.1.10)$$

размерность всех вычисленных значений  $\Delta s$  - кДж/(кг К), знак (-) в  $\Delta s_{4-1}$  сохранить. Результаты вычислений по п. 2 заносим в таблицу 6.2.

2. Определяем подводимую к газу теплоту,  $q_1$  и отводимую от газа теплоту,  $q_2$ :

$$q_1=q_{2-3}=C_v (T_3-T_2)=, \text{ кДж / кг}; \quad (6.2.1)$$

$$q_2=q_{4-1}=C_v (T_1-T_4)=, \text{ кДж / кг}, \quad (6.2.2)$$

где  $q_{2-3}$  - теплота изохорного процесса 2-3;  $q_{4-1}$  - теплота изохорного процесса 4-1. (теплоты процессов  $q_{1-2}=0$  и  $q_{3-4}=0$ , т.к. это процессы адиабатные) Результаты вычислений по пункту 3 заносим в таблицу 6.3.

3. Определяем работу цикла

$$\ell_{\text{ц}} = q_{\text{пол}} = q_1 - q_2 =, \text{ кДж/кг} \quad (6.3.1)$$

4. Определяем термический КПД цикла

$$\eta_t = \ell_{\text{ц}}/q_{\text{подв.}} = \ell_{\text{ц}}/q_1 =, \quad (6.4.1)$$

5. Определяем термический КПД цикла Карно, который осуществляется в том же интервале температур, что и заданный цикл

$$\eta^k = T - T/1 =, \quad (6.5.1)$$

при этом  $\eta$  должен быть меньше  $\eta^k$ .  $t_{\text{min}}$ ,  $t_{\text{max}}$ ,  $t$

6. Определяем относительный КПД (должен быть меньше 1)

$$\eta_{\text{от}} = \eta_t/\eta^k =, \quad (6.6.1)$$

Результаты вычислений по п.п. 3, 4, 5, 6, 7 заносим в таблицу 6.3.

7.Выполняем графическую часть задания в масштабе строим заданный цикл ДВС в координатах P-v и T-s.

а) Для облегчения построения цикла в координатах P-v вычисляем давления в промежуточных точках адиабатных процессов: —a—, —b—, —c—, —d—, рис 5-а. (Перед расчетом давлений следует произвольно задаться удельными объемами в этих точках:  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ,  $v_d$ ).

Промежуточные давления:

$$P_a = P_1 (v_1/v_a)^{k=}; \quad (6.7.1)$$

$$P_b = P_1 (v_1/v_b)^{k=}; \quad (6.7.2)$$

$$P_c = P_4 (v_4/v_c)^{k=}; \quad (6.7.3)$$

$$P_d = P_4 (v_4/v_d)^{k=}. \quad (6.7.4)$$

По полученным давлениям и данным из таблицы 1 строим в масштабе цикл ДВС в координатах  $P-v$ , (см. рис.5-а).

б) Для облегчения построения цикла в координатах  $T-s$  задаемся температурами в двух вспомогательных точках —а— и —b—:

$$T_a = 0,5(T_2 + T_3) = , K; \quad (6.7.5)$$

$$T_b = 0,5(T_1 + T_4) = , K. \quad (6.7.6)$$

Тогда изменения энтропии

$$\Delta S_{2-a} = C_v \ln(T_a/T_2) = , \text{кДж/(кг К)}; \quad (6.7.7)$$

$$\Delta S_{1-b} = C_v \ln(T_b/T_1) = , \text{кДж/(кг К)}. \quad (6.7.8)$$

По полученным результатам, температурам из таблицы 6.1 и значениями  $\Delta s$  из таблицы 6.2 рисуем в масштабе цикл ДВС в координатах  $T-s$

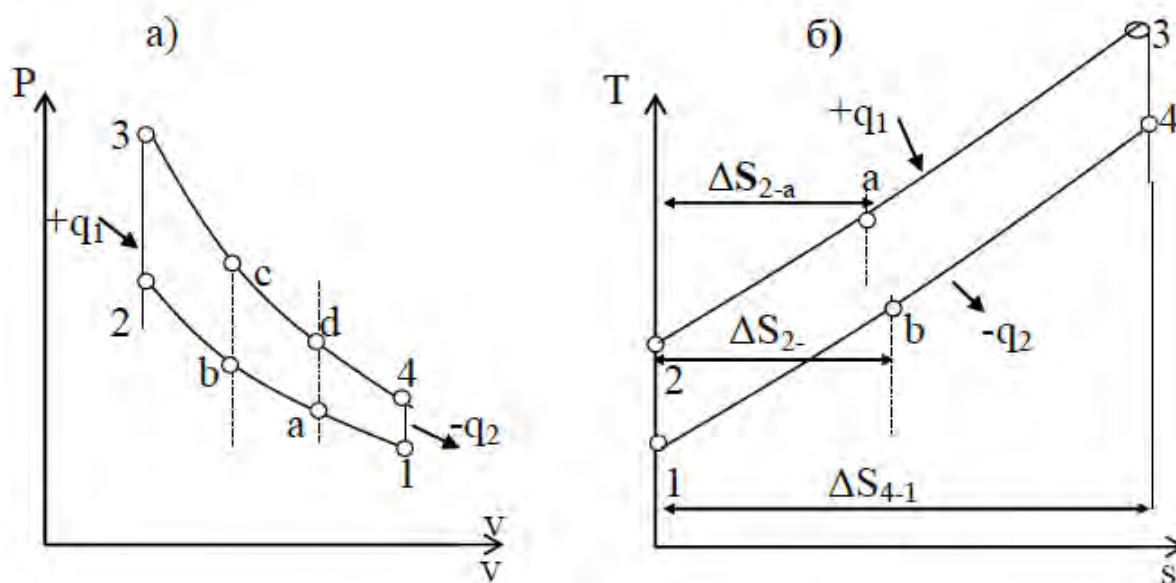


Рис.5 Теоретический цикл ДВС с изохорным сгоранием в  $P-v$  (а) и  $T-s$  (б) координатах

## ЗАДАЧА № 7

Из котла влажный пар с параметрами  $P_1$  кПа и сухостью  $x_1$  поступает в пароперегреватель, где в процессе  $P=\text{const}$  подсушивается до состояния сухого насыщенного пара, а затем перегревается до температуры  $t$  °С. Полученный перегретый пар на лопатках турбины адиабатно расширяется до давления  $P_4$ .

Определить параметры пара ( $P$ ,  $t$ ,  $v$ ,  $h$ ,  $s$ ) в начале и в конце каждого из процессов: 1-2, 2-3 и 3-4, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии пара в процессах, работу и теплоту процессов. Результат решения свести в таблицу.

Таблица 7.1 - Параметры точек в процессах: 1-2, 2-3 и 3-4

Точка	Исходные параметры	$P$ , кПа	$t$ , °С	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$h$ , кДж/кг	$s$ , кДж/(кг К)
1	$P_1=$ , кПа; $x_1=$					
2	$P_2=P_1=$ ; $x_2=1$					
3	$P_3=P_1=$ ; $t_3=$ , °С					
4	$P_4=$ , кПа; $s_4=s_3$					

Таблица 7.2 - Таблица исходных данных.

Последняя цифра шифра	$x_1$	$P_1$ , кПа	Предпол. цифра шифра	$t_3$ , °С	$P_4$ , кПа
0	0,9	500	0	300	2
1	0,95	1000	1	400	5
2	0,95	1000	2	450	10
3	0,98	500	3	350	3
4	0,95	1500	4	400	4
5	0,93	2000	5	450	5
6	0,9	3000	6	500	5
7	0,9	1500	7	450	2
8	0,95	2000	8	400	3
9	0,9	3000	9	350	4

Исходные данные:  $P_1=$  , кПа;  $x_1=$  ;  $t_3=$  , °С;  $P_4=$  , кПа.

## Решение

В  $h-s$  диаграмме (рис. 6) находим изобару  $P_1$  и на пересечении ее с линией сухости  $x_1$  определяем точку, соответствующую началу процесса – точку 1. Из этой точки поднимаемся по данной изобаре  $P_1$  до пересечения с верхней пограничной кривой ( $x=1$ ). Получаем точку 2 и заданный процесс подсушки 1-2. В данном процессе пар из влажного насыщенного переходит в сухой насыщенный.

Температуры в т.т. 1 и 2 одинаковые и равняются температуре насыщения при давлении  $P_1$ , т.е.  $t_1=t_2=t_{н1}$ , см. рис.6.

При дальнейшем подводе тепла в пароперегревателе сухой насыщенный пар начинает перегреваться при том же давлении  $P_1$  до температуры  $t_3$ . Точка 3 определяется пересечением изобары  $P_1$  с изотермой  $t_3$ . Процесс 2-3 – процесс перегрева пара относительно температуры насыщения.

Далее следует адиабатное расширение пара до давления  $P_4$ . Адиабатный процесс изображается вертикальной линией ( $s=Const$ ) от т.3 до пересечения с изобарой  $P_4$ . Получаем точку 4 и процесс 3-4. Температура в т.4 определяется изотермой, проходящей через эту точку. Через точки 1,2,3,4 проводим основные линии: линии объема  $v_1, v_2, v_3, v_4$ ; линии энтальпии  $h_1, h_2, h_3, h_4$  и линии энтропии  $s_1, s_2, s_3, s_4$ . По  $h-s$  диаграмме снимаем показания всех перечисленных параметров и заносим их в выше приведенную таблицу. Далее следует расчет всех процессов: 1-2, 2-3 и 3-4.

Процесс 1-2 – подсушка пара:

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = (h_2 - h_1) - P_1 (v_2 - v_1) = \text{, кДж/кг;} \quad (7.1.1)$$

изменение энтальпии

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \text{, кДж/кг;} \quad (7.1.2)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \text{, кДж/(кг·К);}$$

(7.1.3)

работа процесса

$$\ell = P_1 (v_2 - v_1) = \text{, кДж/кг;} \quad (7.1.4)$$

теплота процесса

$$q = h_2 - h_1 = \text{, кДж/кг.} \quad (7.1.5)$$

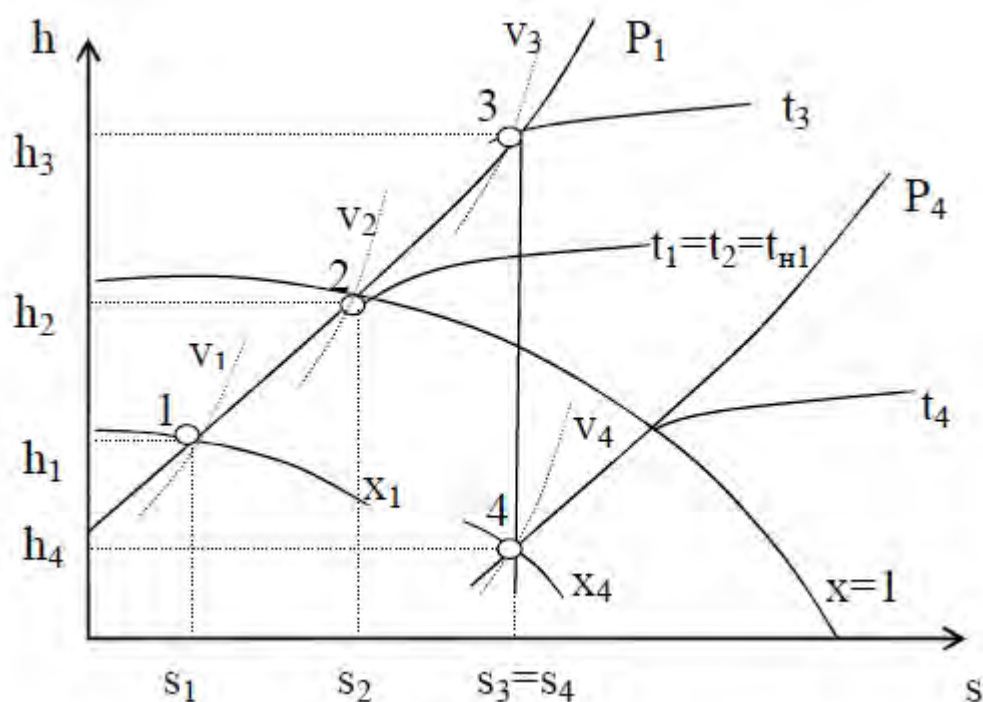


Рис.6. Процессы: 1 – 2 - подсушки пара, 2 – 3 - перегрев пара, 3 - 4 - расширения пара в турбине в h-s координатах

Процесс 2-3 – перегрев пара:

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = (h_3 - h_2) - P_2 (v_3 - v_2) = \text{, кДж/кг;} \quad (7.2.1)$$

изменение энтальпии

$$\Delta h = h_3 - h_2 = \text{, кДж/кг;} \quad (7.2.2)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = s_3 - s_2 = \text{, кДж/(кг·К);} \quad (7.2.3)$$

работа процесса

$$\ell = P_1 (v_3 - v_2) = \text{, кДж/кг;} \quad (7.2.4)$$

теплота процесса

$$q = h_3 - h_2 = \text{, кДж/кг.} \quad (7.2.5)$$

Процесс 3-4 – адиабатное расширение пара:

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = (h_4 - h_3) - (P_4 v_4 - P_3 v_3) = \text{, кДж/кг;} \quad (7.3.1)$$

изменение энтальпии

$$\Delta h = h_4 - h_3 = \text{, кДж/кг;} \quad (7.3.2)$$

изменение энтропии

$$\Delta s = s_4 - s_3 = 0; \quad (7.3.3)$$

работа процесса

$$l = -\Delta u =, \text{кДж/кг}; \quad (7.3.4)$$

теплота процесса  $q=0$ .

Примечание: Размерность давлений во всех перечисленных выше формулах – кПа.

### ЗАДАЧА № 8

В калорифер поступает атмосферный воздух с температурой  $t_1$  °С и относительной влажностью  $\varphi_1$  %. В нем воздух нагревается до температуры  $t_2$  °С. Подогретый воздух направляется в сушилку, где в процессе сушки материала его температура снижается до  $t_3$  °С.

Определить конечное влагосодержание воздуха, количество поглощенной из материала влаги, расход воздуха и тепла на один кг испаренной влаги. Процессы подогрева воздуха и сушки изобразить в Н-d диаграмме.

Таблица 8.1 - Исходные данные для расчета.

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\varphi_1, \%$	Предпол. цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
0	10	80	0	98	35
1	12	75	1	96	36
2	15	70	2	94	37
3	20	65	3	92	38
4	20	60	4	90	39
5	25	65	5	88	40
6	22	50	6	85	40
7	24	45	7	85	42
8	26	40	8	80	45
9	28	35	9	80	45

Исходные данные:  $t_1 = , ^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_1 = , \%$ ;  $t_2 = , ^\circ\text{C}$ ;  $t_3 = , ^\circ\text{C}$ .

Решение.

По Н-d диаграмме, (рис.7), находим начальное состояние воздуха на пересечении изотермы сухого термометра  $t_1$  с линией относительной влажности  $\varphi_1$ , (точка 1), для которой снимаем параметры  $d_1$  и  $H_1$ .

Процесс подогрева воздуха будет изображаться вертикальной прямой ( $d_1 = \text{Const}$ ), процесс 1-2. Положение точки 2

определяется пересечением линий  $d_1 = \text{Const}$  и изотермой сухого термометра  $t_2$ . Через точку 2 проводим линию  $H_2 = \text{Const}$  и снимаем ее показание.

После калорифера воздух с температурой  $t_2$  поступает в сушильную камеру, где испаряет влагу из высушиваемого материала, а сам увлажняется. Процесс адиабатного увлажнения воздуха в сушильной камере изображается линией  $H_2 = \text{Const}$  до пересечения с изотермой  $t_3$ , процесс 2-3. Точка 3 характеризует состояние воздуха после сушильной камеры. Для этой точки снимаем показания  $d_3$ , г/кг с. в.;  $\varphi_3$ , %. Параметры точек вносим в таблицу.

Таблица 8.2 – Параметры состояния влажного воздуха

Параметры	Точки		
	1	2	3
$t$ , °C			
$d$ , г/кг с.в			
$H$ , кДж/кг с.в			

Производим основные вычисления

1) Количество влаги, которое принимает в сушилке каждый кг сухого воздуха  $\Delta d = d_3 - d_2$ , г/кг с.в;

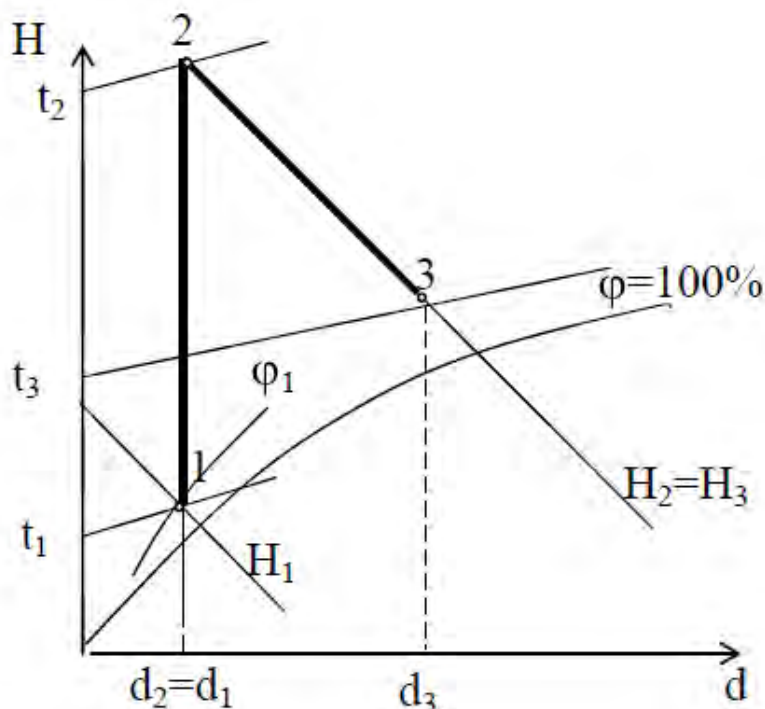


Рис.7. Схема процессов во влажном воздухе в сушильной установке: 1-2-процесс подогрева воздуха в калорифере;



2-3-процесс идеальной сушки (испарения влаги)

1) Количество сухого воздуха, необходимого на испарение 1 кг влаги испаренной влаги

$$\ell = 1000 / (d_3 - d_2) = \text{, кг с.в./1кг} \quad (8.1)$$

2) Расход теплоты в калорифере

$$q_{1-2} = H_2 - H_1 = \text{, кДж/кг с.в.;} \quad (8.2)$$

3) Расход тепла на 1 кг испаренной влаги

$$Q_{1-2} = \ell \cdot q_{1-2} = \text{, кДж/1 кг} \quad (8.3)$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Таблица выбора №№ контрольных вопросов

Последняя цифра шифра	№№ контрольн. вопросов	Предпоследн. цифра шифра	№№ контрольн. вопросов
0	1, 11	0	21, 40
1	2, 12	1	22, 30
2	3, 13	2	23, 31
3	4, 14	3	24, 32
4	5, 15	4	25, 33
5	6, 16	5	26, 34
6	7, 19	6	27, 35
7	8, 17	7	28, 36
8	9, 18	8	39, 37
9	10, 20	9	29, 38

### Вопросы

1. Что такое параметр состояния? Какие параметры приняты в технической термодинамике за основные?

2. Какие диаграммы имеют наибольшее практическое применение в термодинамике и почему? В какой из диаграмм площадь под кривой процесса определяет работу этого процесса? Какие знаки работы? В какой из диаграмм площадь под кривой процесса определяет теплоту этого процесса? Какие знаки теплоты?

3. Уравнение состояния идеального газа. Индивидуальная и универсальная газовые постоянные.

4. Что такое массовый и объемный составы смеси

идеальных газов и как можно перейти от одного состава к другому?

5. Первый закон термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики.

6. Основные термодинамические процессы идеальных газов. Их изображение в координатах  $P-v$  и  $T-s$ .

7. Что такое теплоемкость? Виды теплоемкостей. Связь между различными теплоемкостями.

8. Что такое процессы испарения и кипения? Чем они отличаются друг от друга? Являются ли температура и давление при кипении независимыми параметрами?

9. Виды паров. Какие параметры характеризуют каждый из паров? Укажите области существования этих паров в системах координат:  $P-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$ .

10. Дайте определение перегретого, сухого насыщенного и влажного паров. Укажите область расположения этих паров в диаграммах:  $P-v$ ,  $T-s$  и  $h-s$  для пара. Как найти параметры перегретого пара?

11. Покажите с помощью  $h-s$  диаграммы для пара изотермический и изобарный процессы расширения пара. Как будут изменяться параметры пара? (каждый из процессов начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого пара).

12. Сущность графического метода расчета паровых процессов. Чем он отличается от расчета процессов для идеальных газов?

13. Какой воздух называется влажным воздухом? Что такое насыщенный и ненасыщенный воздух?

14. Что такое влагосодержание, относительная влажность и степень насыщения влажного воздуха? Как определить эти величины с помощью  $H-d$  диаграммы влажного воздуха? Приведите пример.

15. Какими параметрами можно задать состояние воздуха в  $H-d$  диаграмме влажного воздуха? Покажите на примере.

16. Что такое температура точки росы? Как определить ее с помощью  $H-d$  диаграммы влажного воздуха? Приведите пример.

17. В чем сущность второго закона термодинамики? Дайте

основные формулировки этого закона.

18. Дайте описание цикла Карно. Почему цикл Карно называется идеальным?

19. Идеальный и реальный компрессоры. Дать определения и их индикаторные диаграммы.

20. Изобразите в  $P-v$  диаграмме изотермический политропный и адиабатный процессы сжатия рабочего тела в компрессоре и покажите работу, затрачиваемую на эти процессы. Какой из них наиболее экономичен?

21. Изобразите в  $T-s$  координатах процесс политропного сжатия в 3-х ступенчатом компрессоре с показателем политропы  $1 < n < k$ . Покажите на графике тепло, отводимое от газа в рубашках цилиндров компрессора и в промежуточных холодильниках.

22. При каких условиях осуществляется многоступенчатое сжатие? Что дает многоступенчатое сжатие по сравнению с одноступенчатым?

23. Как осуществляется рабочий процесс в ДВС со сгоранием топлива при постоянном объеме? Какое топливо применяют? Почему нельзя применять высокие степени сжатия?

24. Дать описание идеального цикла ДВС со смешанным подводом тепла. Изобразить его в координатах  $P-v$  и  $T-s$ .

25. Как влияет степень сжатия на термический КПД идеального цикла двигателей внутреннего сгорания и какие факторы ограничивают его величину?

26. Изобразите принципиальную схему газотурбинной установки без регенерации, опишите процессы в ее элементах и постройте идеальный цикл этой установки в координатах  $P-v$  и  $T-s$ .

27. Изобразите принципиальную схему газотурбинной установки с регенерацией, опишите процессы в отдельных ее элементах и покажите на графике в  $T-s$  диаграмме, как осуществляется в такой установке регенерация тепла.

28. Опишите преимущества газотурбинных установок по сравнению с поршневыми двигателями внутреннего сгорания.

29. Для осуществления каких процессов применяются сопла и диффузоры? Приведите примеры технического использования этих устройств.

30. Дайте описание комбинированного сопла Лавалья. Как определить скорость истечения и секундный расход газа и пара при выходе из сопла Лавалья?

31. Опишите процесс дросселирования. Покажите с помощью  $h-s$  диаграммы как изменяется состояние водяного пара при дросселировании.

32. Изобразите цикл Ренкина в  $P-v$  и  $T-s$  координатах и поясните, что представляют собой отдельные процессы, из которых он состоит? В каких элементах паросиловой установки протекают эти процессы?

33. Как определить термический КПД в цикле Ренкина? Каково влияние начального давления  $P_1$  и начальной температуры  $t_1$  пара на термический КПД цикла Ренкина? Каково влияние конечного давления  $P_2$  на термический КПД цикла?

34. Изобразите в  $h-s$  диаграмме процесс расширения пара в турбине паросиловой установки с промежуточным перегревом пара. Покажите на графике, как сказывается промежуточный перегрев пара на конечной влажности пара.

35. В чем заключается сущность комбинированной выработки электрической энергии и тепла на ТЭЦ и каковы ее преимущества по сравнению с отдельной выработкой их? Для сопоставления используйте  $T-s$  диаграмму. Что такое коэффициент использования тепла теплофикационной установки?

36. Изобразите в  $T-s$  диаграмме идеальный цикл парокомпрессионной холодильной установки и опишите процессы, из которых он состоит.

37. Какими свойствами должны обладать вещества, применяемые в качестве холодильных агентов в парокомпрессионных холодильных установках?

38. В чем состоит принципиальное отличие цикла теплового насоса от цикла холодильной установки? Изобразить в  $T-s$  диаграмме идеальные циклы обеих установок.

39. Дать описание воздушной холодильной установки и представить ее идеальный цикл в  $P-v$  и  $T-s$  координатах. В чем недостатки этой холодильной установки?

40. Дать описание схемы и цикла теплового насоса. Каким коэффициентом характеризуется эффективность цикла теплового

насоса?

### **Библиографический список**

1. Теплотехника: [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
2. Техническая термодинамика и теплотехника: [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.
3. Селин В. В. Техническая термодинамика [Текст] : учебное пособие / В.В. Селин, В. М. Фокин. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. - 132 с.
4. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А.А. Захаровой. - М.: Академия, 2006. - 272 с.
5. Брюханов О. Н. Основы гидравлики и теплотехники: [Текст]: учебник / О. Н. Брюханов, А. Т. Мелик-Аракелян, В. И. Коробко. - 2-е изд., стер. - М.: Академия, 2006. - 240 с.
6. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1 - Физические константы некоторых газов

Вещество	Формула	Мол. масса, $\mu$ , кг/кмоль	Плотн. газа, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	R, Дж/(кг К)
Воздух	-	28,96	1,29	287,0
Кислород	O	32,00	1,429	259,8
Азот	N	28,026	1,252	296,8
Водород	H	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Углекислый газ	CO	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO	64,06	2,926	129,8
Метан	CH	16,032	0,717	518,8
Этилен	CH	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH	17,032	0,771	488,3
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18,016	0,804	461,0

Таблица П.2 - Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов при P=Const

Газ	Истинная теплоемкость $\mu C_p$ , кДж/(кмоль К)	Средняя теплоемкость $\mu C_{pm}$ , кДж/(кмоль К)
В пределах от 0 до 1000 <sup>o</sup> C		
O <sub>2</sub>	$\mu C_p = 29,5802 + 0,0069706 t$	$\mu C_{pm} = 29,2080 + 0,0040717 t$
N <sub>2</sub>	$\mu C_p = 28,5372 + 0,0053905 t$	$\mu C_{pm} = 28,7340 + 0,0023488 t$
CO	$\mu C_p = 28,7395 + 0,0058862 t$	$\mu C_{pm} = 28,8563 + 0,0026808 t$
SO <sub>2</sub>	$\mu C_p = 42,8728 + 0,0132043 t$	$\mu C_{pm} = 40,4386 + 0,0099562 t$
Воздух	$\mu C_p = 28,7558 + 0,0057208 t$	$\mu C_{pm} = 28,8270 + 0,0027080 t$
H <sub>2</sub> O	$\mu C_p = 32,8367 + 0,0116611 t$	$\mu C_{pm} = 33,1494 + 0,0052749 t$
В пределах от 0 до 1500 <sup>o</sup> C		
H <sub>2</sub>	$\mu C_p = 28,3446 + 0,003519 t$	$\mu C_{pm} = 28,7210 + 0,0012008 t$
CO <sub>2</sub>	$\mu C_p = 41,3597 + 0,0144985 t$	$\mu C_{pm} = 38,3955 + 0,0105838 t$

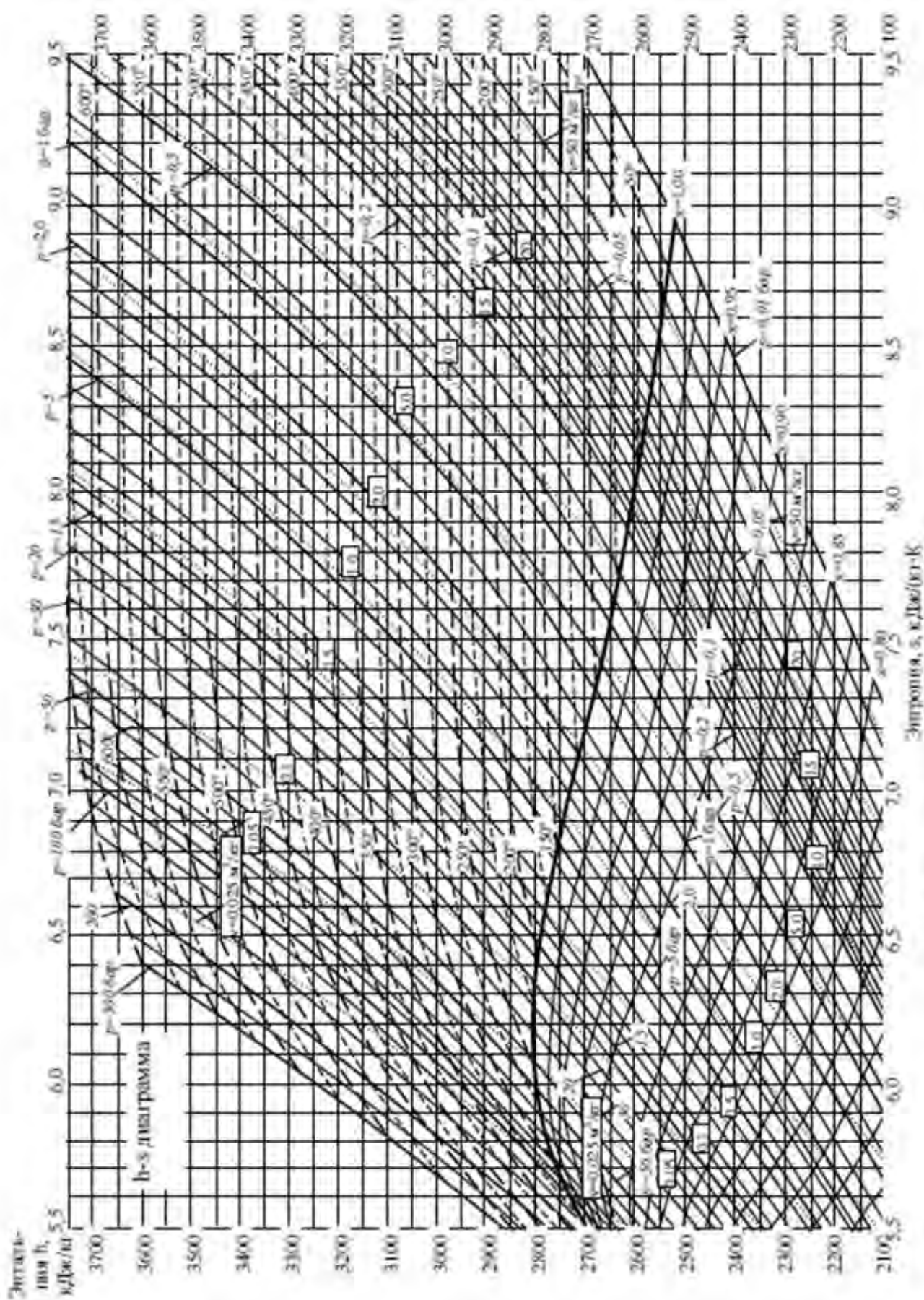


Рис. 8. h-s диаграмма водяного пара

H - d диаграмма влажного воздуха. В=745 мм рт.ст.

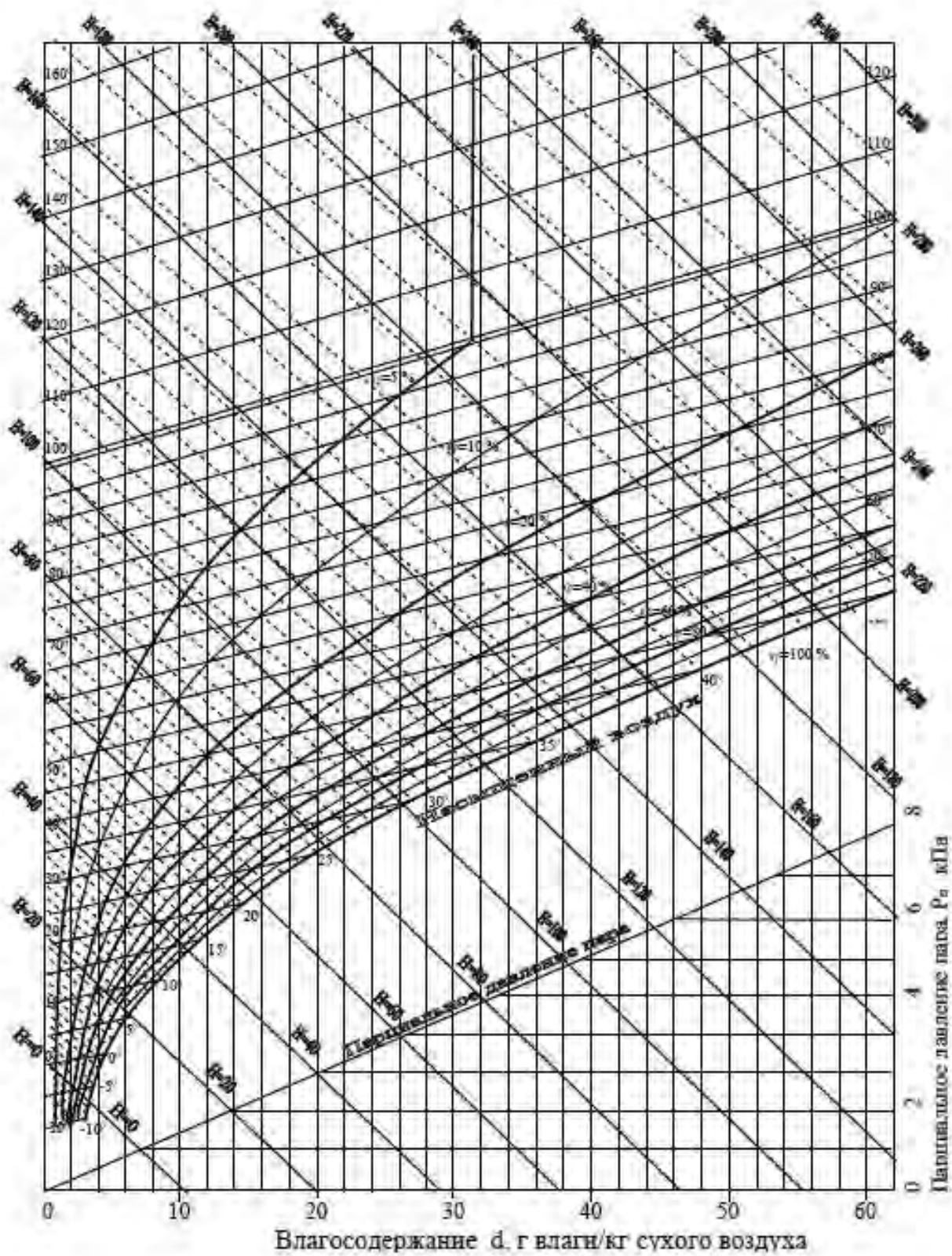


Рис. 9. H-d диаграмма влажного воздуха